

# LA UTILIDAD DE LOS SENSORES DE BAJO COSTO EN LAS GEOCIENCIAS: CASO DE ESTUDIO PARA LA DETECCIÓN DE TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS

Alejandro Rodríguez-Trejo<sup>1\*</sup>, Héctor E. Ibarra-Ortega<sup>1</sup> y Reneé González-Guzmán<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Paleomagnetismo, Instituto de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) Campus Juriquilla. Blvd. Juriquilla 3001, Juriquilla, C.P. 76230, Querétaro, Querétaro, México.

<sup>2</sup>Departamento de Geología, División de Ciencias de la Tierra, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Carretera Ensenada-Tijuana 3918, Zona Playitas, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México.

\*alexrt@geociencias.unam.mx

## RESUMEN

El desarrollo y uso de sensores de bajo costo en combinación con sistemas de microcontroladores como los Raspberry Pi, Arduino y ESP32 ha abierto nuevas posibilidades para el campo de las geociencias, ofreciendo soluciones accesibles y flexibles para el monitoreo y análisis de fenómenos naturales. Estas plataformas permiten la creación de sistemas de monitoreo adaptables y personalizables capaces de registrar diversos parámetros ambientales como temperatura, presión, humedad y variaciones del campo geomagnético. Este artículo explora el uso de estas tecnologías en las geociencias, enfocándose en su aplicabilidad y ventajas, destacando principalmente su bajo costo y versatilidad. En este trabajo se detalla la metodología de desarrollo de una estación meteorológica mediante el uso de un microcontrolador ESP32 y un sensor BMP280, detallando la metodología de conexiones y cableado físico así como la programación del microcontrolador.

También, a través de un caso de estudio centrado en la detección de tormentas geomagnéticas, se utilizaron un ESP32 y un magnetómetro HMC5883L con el objeto de mostrar sus aplicaciones prácticas tanto en contextos académicos como en proyectos comunitarios. El ejemplo pone de manifiesto el potencial de estas herramientas para realizar investigaciones preliminares en lugares con recursos limitados o como introducción a conceptos avanzados en geociencias.

A pesar de la limitante de los sensores de bajo costo en comparación con la gran precisión de los equipos de alta gama utilizados en laboratorios especializados, los primeros ofrecen una excelente oportunidad para realizar investigaciones exploratorias, proyectos educativos y la extensión de redes de monitoreo en áreas donde la infraestructura tecnológica es limitada. La facilidad de integración y programación, junto con la gran cantidad de

documentación disponible, hacen que estas tecnologías sean ideales para científicos, educadores y estudiantes, facilitando el acceso a herramientas que de otro modo estarían fuera de su alcance. De este modo, estos sistemas representan una valiosa contribución para el avance de las ciencias de la Tierra y su difusión en sectores más amplios de la sociedad.

**Palabras clave:** Sensores de bajo costo, monitoreo ambiental, geociencias, Raspberry Pi, Arduino, ESP32, tormentas geomagnéticas.

## ABSTRACT

*The development and implementation of low-cost sensors, in combination with microcontroller systems such as Raspberry Pi, Arduino, and ESP32, have opened new avenues in the field of geosciences, providing accessible and flexible solutions for the monitoring and analysis of natural phenomena. These platforms allow for the creation of adaptable and customizable monitoring systems capable of recording various environmental parameters, such as temperature, pressure, humidity, and geomagnetic field variations. This article examines the application of these technologies in geosciences, with a particular focus on their advantages and potential uses, primarily emphasizing their low cost and versatility. These features in scientific instrumentation can democratize access to research and promote science-oriented education.*

*Through a case study on the detection of geomagnetic storms using an ESP32 and an HMC5883L magnetometer, the article presents a step-by-step tutorial on how to set up an efficient and affordable monitoring system, with the aim of showcasing its practical applications in both academic and community-based projects. The case study underscores the potential of these tools*

for conducting preliminary research in resource-constrained environments or as an introduction to more advanced concepts in geosciences.

Although low-cost sensors may be limited in precision compared to high-end equipment used in specialized laboratories, they offer significant opportunities for exploratory research, educational initiatives, and the expansion of monitoring networks in areas with limited technological infrastructure. Their ease of integration and programming, coupled with the abundance of available documentation, make these technologies highly suitable for scientists, educators, and students, providing access to tools that would otherwise be unattainable. In this way, these systems represent a valuable contribution to the advancement of geological sciences and their broader dissemination to diverse sectors of society.

**Keywords:** *Low-cost sensors, environmental monitoring, geosciences, Raspberry Pi, Arduino, ESP32, geomagnetic storms.*

## INTRODUCCIÓN

En la última década, el avance de la tecnología ha permitido que la ciencia aplicada y la ingeniería sean más accesibles a través de dispositivos electrónicos de bajo costo y alto rendimiento. Microprocesadores y microcontroladores como los Raspberry Pi, Arduino y ESP32, junto con una variedad de sensores asequibles, han transformado la forma en la que se realizan diversos estudios científicos, especialmente en disciplinas como las geociencias (por ejemplo, Anthony *et al.*, 2019; Rodríguez-Trejo *et al.*, 2024). Estos dispositivos, que años atrás eran considerados herramientas para aficionados o para fines solamente educativos, han encontrado aplicaciones cada vez más serias y robustas en investigaciones científicas, algunas publicaciones se relacionan con el monitoreo ambiental (Rodríguez-Trejo *et al.*, 2024) y los estudios geofísicos (De Plaen *et al.*, 2020).

Estos sistemas son atractivos no solo por su bajo costo, sino también por su versatilidad y facilidad de uso. A una fracción del precio de los equipos de alta precisión, es posible montar estaciones de monitoreo completas que incluyen múltiples sensores, conectividad a internet y capacidades de almacenamiento y procesamiento de datos. Esta accesibilidad tecnológica permite a investigadores y estudiantes desarrollar proyectos que, en el pasado, habrían sido inviables debido al alto costo y a la complejidad del equipo requerido.

En las geociencias, los dispositivos de monitoreo se han utilizado para medir cuantitativamente fenómenos naturales como sismos, tormentas geomagnéticas, calidad del aire y clima, entre otros.

### Importancia del uso de sensores de bajo costo en las geociencias

El desarrollo de sensores y microprocesadores de bajo costo está revolucionando la investigación en las geociencias que involucran monitoreo y recolección de datos en tiempo real. Estas herramientas han permitido que más instituciones, incluyendo las universidades y centros de investigación con recursos limitados, amplíen la posibilidad de hacer ciencia ciudadana y participar en

proyectos interinstitucionales. Los dispositivos como el Arduino, el ESP32 y las Raspberry Pi ofrecen plataformas flexibles que se pueden programar fácilmente para interactuar con una variedad de sensores que registran parámetros como la temperatura, humedad, presión y particulado atmosférico, campo magnético y aceleración, entre otros.

### Microcomputadoras y microcontroladores: un breve repaso

El Arduino es una plataforma de hardware libre (Figura 1a) que se ha ganado un lugar en el ámbito educativo y científico debido a su facilidad de programación y su capacidad de interactuar con una gran variedad de sensores y dispositivos externos (Ismailov y Jo'Rayev, 2022). A pesar de ser menos potente que dispositivos como la Raspberry Pi, el Arduino es ideal para aplicaciones donde se requieren tareas simples como leer sensores y enviar datos a otros dispositivos vía Wifi.

El Raspberry Pi es una microcomputadora diseñada originalmente como una computadora de bajo costo y alto desempeño que ha demostrado ser sumamente útil en proyectos científicos debido a su capacidad de ejecutar sistemas operativos completos de código libre (Figura 1b) y a su gran número de puertos de entrada/salida (Richardson y Wallace, 2014). Gracias a su capacidad de procesamiento, se puede utilizar para almacenar, procesar y visualizar datos directamente desde cualquier dispositivo detector de parámetros físicos.

El ESP32, que combina tecnología System on a Chip (SoC por sus siglas en inglés) que es básicamente un sistema completo montado en una placa, es un microcontrolador de bajo consumo de energía que incorpora conectividad dual Wifi y Bluetooth integrada (Figura 1c), permitiendo la transmisión remota de datos a plataformas en la nube o a dispositivos móviles (Maier *et al.*, 2017; Cameron, 2023). Esto lo convierte en una herramienta ideal para aplicaciones de monitoreo en tiempo real, especialmente en lugares de difícil acceso donde no es posible una conexión alámbrica a internet.

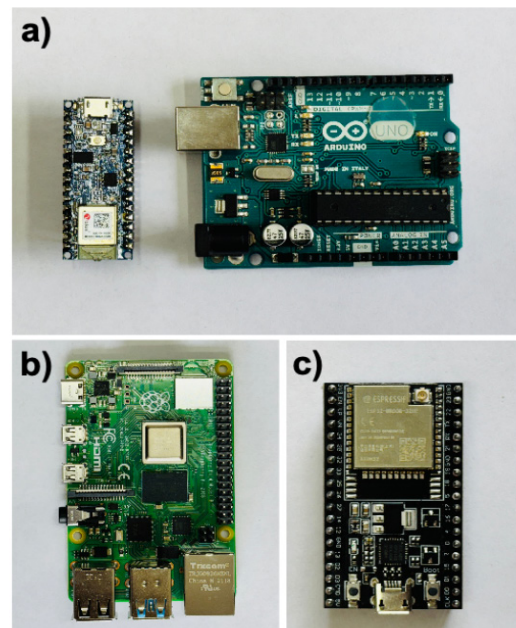


Figura 1. a) Dispositivos Arduino; b) dispositivo Raspberry Pi 4; c) dispositivo ESP32.

## Aplicaciones en geociencias

### Monitoreo ambiental en tiempo real

Uno de los usos más comunes de los sensores de bajo costo en geociencias es la creación de estaciones de monitoreo ambiental. Con sensores de calidad del aire, como los PMS5003 que miden la concentración de material particulado (PM) 1.0, 2.5 y 10 en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Kaur y Kelly, 2023), temperatura, presión atmosférica, humedad y velocidad del viento, por ejemplo, es posible establecer una red de monitoreo ambiental. Dispositivos como las Raspberry Pi o el ESP32 permiten la captura y transmisión de datos en tiempo real, lo que es crucial para el seguimiento de fenómenos meteorológicos y climáticos. Las cualidades de estos dispositivos hacen posible la implementación de redes de monitoreo ambiental en comunidades pequeñas, ciudades, y localidades que no tienen acceso a dispositivos de alta precisión.

En el Instituto de Geociencias (IGc), de la UNAM Campus Juriquilla, se desarrolló un dispositivo denominado Estación de Monitoreo Geo Ambiental (EMGA; Figura 2), con el cual se pueden medir en tiempo real ocho variables ambientales que incluyen calidad del aire (PM 2.5 y 10), temperatura, humedad, presión atmosférica, ruido ambiental y deformación del campo magnético terrestre. Estos parámetros se monitorean con sensores de bajo

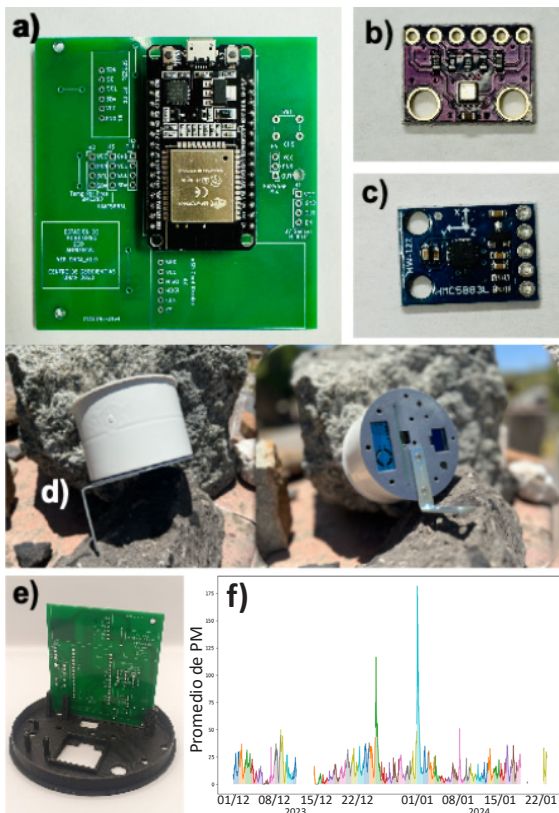


Figura 2. Ejemplificación del desarrollo de la Estación de Monitoreo Geo Ambiental diseñada en el Instituto de Geociencias, UNAM, Campus Juriquilla. a) Placa de desarrollo ESP32 y circuito impreso diseñado para las estaciones EMGA; b) sensor de temperatura, humedad y presión barométrica modelo BME280; c) magnetómetro HMC5883L; d) estación EMGA dentro de su gabinete exterior; e) montaje del circuito impreso sobre un diseño realizado en impresión 3D; f) resultados obtenidos por el sensor de calidad del aire mostrando concentración de material particulado.

costo y se han podido hacer estudios sobre el impacto ambiental, como el ocasionado por la actividad derivada del uso de pirotecnia, con variaciones espaciales y temporales en la ciudad de Querétaro (Rodríguez-Trejo et al., 2024). El IGc diseñó, instaló y opera la Red de Monitoreo Geo Ambiental del Estado de Querétaro, que cuenta con más de 25 estaciones EMGA instaladas en la ciudad de Querétaro y su zona metropolitana. Cabe mencionar que el IGc está en proceso de ampliación de la red de monitoreo en esta ciudad y la expansión de redes de monitoreo similares en otras ciudades de México. El monitoreo integral de estos parámetros ambientales permite a la sociedad conocer el estado de la contaminación en entornos urbanos y el impacto ambiental generado por las actividades antropogénicas.

### Monitoreo sísmico

La detección de actividad sísmica es otra área donde los sensores de bajo costo han encontrado un valioso nicho. Con acelerómetros y microcontroladores como el Raspberry Pi se pueden construir sismógrafos de bajo costo que detecten movimientos en el suelo con origen profundo. Estos dispositivos permiten a científicos y aficionados monitorear terremotos de manera más accesible. Un excelente ejemplo de este tipo de dispositivos aplicados en la sismología es el uso del Raspberry Shake (Figura 3). Este dispositivo es un sismógrafo completo con sensores de alta resolución. El equipo consiste en un dispositivo Raspberry Pi que integra un geófono, un acelerómetro y un sensor de infrasonido. Con estos sensores es posible monitorear la actividad sísmica en tiempo real con una interfaz muy fácil de usar y, a su vez, es posible hacer redes sísmicas de costos considerablemente más bajos con respecto a los sismógrafos convencionales (Anthony et al., 2019). El IGc desarrolló la Red Sísmica del Estado de Querétaro, compuesta por diversos equipos Raspberry Shake instalados en diferentes puntos del estado (De Plaen et al., 2020). Esta red hace posible estudiar la actividad sísmica de la región lo que permite que las autoridades tengan acceso a la información sísmica para establecer planes de contingencia en lugares vulnerables al riesgo sísmico.

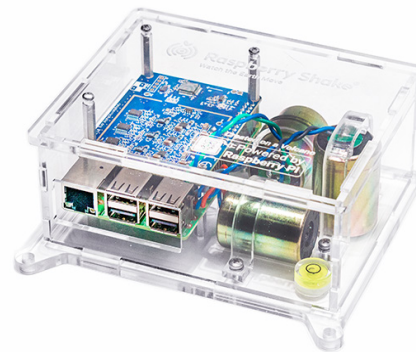


Figura 3. Dispositivo Raspberry Shake. Imagen modificada de <https://raspberrysshake.org/>

### Estudio del campo magnético terrestre

El campo magnético terrestre (CMT) es un fenómeno natural que se origina en el núcleo de la Tierra. Una de sus funciones principales es proteger a nuestro planeta de las radiaciones solares y rayos cósmicos. El CMT tiene la particularidad de variar con el tiempo debido a cambios en el núcleo terrestre y a la interacción con el viento solar. Medir estas variaciones es crucial para entender



procesos geomagnéticos y eventos como las tormentas solares. Aquí es donde los magnetómetros de bajo costo, como el HMC5883L (Figura 4), pueden ayudar en la detección y monitoreo de estos eventos.

El magnetómetro HMC5883L es un sensor de campo magnético de bajo costo que permite medir la intensidad del CMT en tiempo real. Puede ser utilizado en conjunto con un ESP32 para medir el campo magnético local en tiempo real. Esto es útil no sólo para detectar eventos de corta duración como las tormentas geomagnéticas, sino también para conocer las variaciones en espacio y tiempo del CMT. Debido a las características inherentes a este equipo es posible instalar una gran cantidad de estos dispositivos en diferentes localidades, lo que nos brinda un bosquejo de los cambios en el CMT en el tiempo y el espacio.

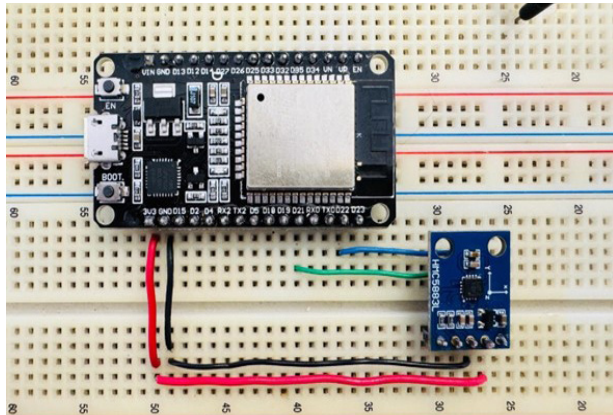


Figura 4. Magnetómetro HMC5883L en conexión con una placa de desarrollo ESP32.

### Sensores de gases

Una aplicación importante de los microcomponentes citados es la medición y detección de diversos gases contaminantes y tóxicos. Actualmente existe una amplia gama de sensores de gases que utilizan instrumentos de bajo costo (Delgado-Castro y Rojas-Bolaños, 2015). En geociencias, estos sensores se pueden utilizar para estudiar la emisión de gases en áreas volcánicas, en zonas con actividad geotérmica o en zonas de alta mineralización o de descomposición de materia orgánica.

Con sensores como el MQ-135 y una Raspberry Pi es posible medir la concentración de gases como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el monóxido de carbono (CO) y otros compuestos volátiles en el aire (Rani *et al.*, 2020). Estos datos pueden ayudar a monitorear la calidad del aire o la actividad volcánica en regiones colindantes o áreas urbanas sumamente industrializadas, ofreciendo alertas en tiempo real cuando los niveles de gases nocivos aumentan.

### Ventajas y desventajas generales del uso de sensores de bajo costo

La implementación de sensores de bajo costo trae consigo una amplia discusión sobre los beneficios y perjuicios de su implementación. Estas percepciones radican principalmente en el uso y aplicación para cada dispositivo y, sobre todo, en el objetivo y el alcance de cada investigación.

### Ventajas

- *Bajo costo*

La accesibilidad de estos equipos en masa para la generación de datos científicos permite una mayor participación en la investigación y la educación. De esta manera se acerca a las instituciones educativas y de investigación con la ciencia ciudadana.

- *Flexibilidad y versatilidad*

Los sensores y microcontroladores de bajo costo para el monitoreo geocientífico pueden adaptarse a una amplia variedad de aplicaciones en geociencias ya que pueden instalarse varios sensores en una misma placa para llevar a cabo desde el monitoreo de la calidad del aire hasta la detección de variaciones en el campo magnético terrestre. Además, la flexibilidad de estas plataformas permite agregar o intercambiar sensores para un mismo puerto según las necesidades del proyecto.

- *Facilidad de uso y programación*

La mayoría de estas plataformas cuentan con una extensa documentación y una comunidad activa de desarrolladores y grupos de colaboradores. Esto facilita el aprendizaje y la implementación de proyectos, incluso para aquellos que no tienen experiencia previa en programación o electrónica.

- *Portabilidad*

Debido a su tamaño diminuto y bajo consumo de energía, los sistemas basados en microcomputadoras y sensores de bajo costo pueden ser fácilmente transportados e instalados en el campo, lo que los hace ideales para estudios en ubicaciones remotas.

### Desventajas

- *Menor precisión*

Aunque estos sensores son útiles para estudios preliminares y educativos, no ofrecen la misma precisión y exactitud que los equipos de laboratorio de alta gama. Esto puede limitar su utilidad en estudios que requieren datos extremadamente detallados.

- *Durabilidad*

Los sensores de bajo costo, al no estar diseñados para soportar condiciones extremas, pueden ser menos robustos y más susceptibles a fallas cuando se usan en climas altamente variables o extremos, como áreas de alta humedad, regiones polares, etc.

- *Interferencias y calibración*

Los sensores de bajo costo pueden ser más susceptibles a interferencias electromagnéticas o ambientales extremas. Además, la calibración de estos sensores puede ser menos estable, lo que requiere ajustes periódicos para mantener la calidad de los datos.

## METODOLOGÍA

### Desarrollo de un sistema base de sensores de bajo costo

En este tutorial describimos los pasos para montar un sistema base que utilice un sensor de presión barométrica y temperatura básicos conectados a un microcontrolador ESP32, aunque el mismo enfoque puede aplicarse a otros tipos de sensores y microcontroladores. La metodología básica consiste en la conexión física del sensor a los puertos del ESP32 así como en su programación y configuración para su funcionamiento.

### Materiales necesarios

Para montar el sistema base se requiere de lo siguiente:

- **ESP32.** Microcontrolador para la programación y control de los sensores.
- **Sensor BMP280.** Es un sensor con la capacidad de medir la temperatura y presión barométrica en el ambiente que puede conectarse de manera simple a un microcontrolador ESP32 o Arduino.
- **Protoboard.** Una placa de pruebas que facilita el montaje temporal de circuitos sin la necesidad de soldar los componentes, permitiendo realizar ajustes de manera rápida y sencilla.
- **Cables de conexión.** Para la conexión del sensor a los puertos de entrada del ESP32.
- **Fuente de alimentación.** Se requieren un cable USB tipo C y una conexión eléctrica para la alimentación del sistema.
- **Computadora con Arduino IDE.** El entorno de desarrollo integrado de Arduino permite programar el ESP32 y cargar el código necesario para interactuar con el sensor. Para ello es necesario descargar y configurar el entorno de desarrollo de la placa ESP32. Para más información se puede consultar el siguiente enlace <https://programarfacil.com/esp8266/programar-esp32-ide-arduino/>.

### Paso 1: conexión física de los componentes

El primer paso es realizar las conexiones físicas entre el ESP32 y el sensor BMP280 (Figura 5). Este sensor utiliza el protocolo de comunicación I2C, se requieren conectar cuatro cables:

- VCC (pin de alimentación) al pin 3.3V del ESP32 (cable rojo).
- GND (tierra) al pin GND del ESP32 (cable negro).

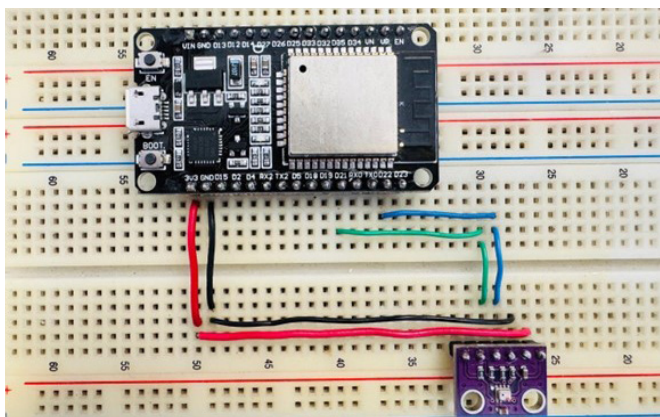


Figura 5. Conexiones entre el Sensor BMP280 y la placa de desarrollo ESP32.

- SCL (línea de reloj del I2C) al pin GPIO 22 del ESP32 (cable azul).
- SDA (línea de datos del I2C) al pin GPIO 21 del ESP32 (cable verde).

### Paso 2: programación del ESP32

Una vez que el hardware esté conectado, el siguiente paso es programar el ESP32 para leer los datos del sensor. Para ello, se utiliza el IDE de Arduino, que soporta de forma nativa al ESP32, facilitando la instalación de bibliotecas y el desarrollo del código.

Inicialmente es necesario instalar el código adecuado para el sensor. Esto se puede hacer desde el gestor de bibliotecas del IDE de Arduino buscando la librería BMP280 e instalándola al IDE (Figura 6). Cabe señalar que cada sensor tiene su propia librería que deberá instalarse. Con la librería instalada, podemos escribir un código básico para leer los valores del campo magnético detectado por el sensor y mostrar los resultados en el monitor serial de la computadora.

El siguiente código (Código 1) es un ejemplo básico de cómo leer los valores del sensor. La Figura 7 muestra la salida del puerto serie generada por este código.

```

/* Instituto de Geociencias
UNAM Campus Juriquilla
Ejemplo de programación de un sensor de temperatura y presión
barométrica
Modelo BMP280
Utilizando una placa de desarrollo ESP32 Groover Kit
y una alimentación vía USB de 5 V
El código usado se modificó del incluido de manera nativa en
Arduino IDE 2.3.2
*/

#include <Wire.h>. /* Declaracion de librerías*/
#include <SPI.h>
#include <Adafruit_BMP280.h> // Esta librería es la que controla el
Sensor BMP280

Adafruit_BMP280 bmp; // use I2C interface
Adafruit_Sensor *bmp_temp = bmp.getTemperatureSensor(); //
Declaración de variables
Adafruit_Sensor *bmp_pressure = bmp.getPressureSensor();

/*configuración de variables y conexiones al puerto serie*/

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while ( !Serial ) delay(100); // se activa la conexión al puerto USB
  Serial.println(F("BMP280 Sensor event test"));

  unsigned status;
  status = bmp.begin(BMP280_ADDRESS_ALT, BMP280_CHIPID);
  status = bmp.begin(0x76);
  if (!status) { /* Aquí se valida que el sensor funcione correctamente
  */
    Serial.println(F("Could not find a valid BMP280 sensor, check
wiring or "
                    "try a different address!"));
    Serial.print("SensorID was: 0x"); Serial.println(bmp.sensorID(),16);

```

```

Serial.print(" ID of 0xFF probably means a bad address, a BMP
180 or BMP 085\n");
Serial.print(" ID of 0x56-0x58 represents a BMP 280.\n");
Serial.print(" ID of 0x60 represents a BME 280.\n");
Serial.print(" ID of 0x61 represents a BME 680.\n");
while (1) delay(10);
}

/* Aquí se activa el muestreo de la temperatura y presión en el
sensor BMP280 */

bmp.setSampling(Adafruit_BMP280::MODE_NORMAL,
Adafruit_BMP280::SAMPLING_X2,
Adafruit_BMP280::SAMPLING_X16,
Adafruit_BMP280::FILTER_X16,
Adafruit_BMP280::STANDBY_MS_500);

bmp_temp->printSensorDetails();
}
/*Aquí comienza la etapa cíclica del programa */
void loop() {
sensors_event_t temp_event, pressure_event;
bmp_temp->getEvent(&temp_event);
bmp_pressure->getEvent(&pressure_event);
/* Aquí se imprimen en el monitor serie los datos obtenidos por
el sensor */
Serial.println("Instituto de Geociencias");
Serial.println("UNAM Campus Juriquilla");
Serial.println("Sensores de bajo costo");
Serial.print(F("Temperatura = "));
Serial.print(temp_event.temperature);
Serial.println(" °C");

Serial.print(F("Presión Barométrica = "));
Serial.print(pressure_event.pressure);
Serial.println(" hPa");

Serial.println();
delay(20000); /* Aquí se puede ajustar el tiempo de espera para
la siguiente lectura. Actualmente está dispuesto para esperar 20
segundos */
} /* Fin del programa */

```

Código 1. Con este código el dispositivo mostrará dos valores: temperatura (°C) y presión barométrica (hPa). Se puede modificar el código para regular el tiempo de espera entre la toma de datos, que puede ir desde cada segundo hasta minutos, días, horas, etc. (se puede copiar y pegar directo en el IDE). Está configurado para un tiempo de espera de 20 segundos. El código se modificó del incluido en el IDE de Arduino 1.8.19 (<https://www.arduino.cc/en/software>).

### Paso 3: Almacenamiento y visualización de los datos

Un aspecto clave en cualquier sistema de monitoreo es la capacidad de almacenar o visualizar los datos recolectados. Gracias a las capacidades del ESP32, es posible enviar los datos a la nube utilizando su conectividad Wifi. Existen varias plataformas que permiten almacenar y visualizar los datos en tiempo real en un servidor web o un dispositivo móvil; o bien guardarlos de manera local en una tarjeta SD. Hay diferentes alternativas de código para estos fines, los cuales pueden encontrarse fácilmente en internet.

- **Envío a un servidor.** Los datos obtenidos pueden ser enviados a otros dispositivos por enlaces mediante la red (http) o vía bluetooth, con lo que se puede hacer monitoreo de manera remota.
- **Almacenamiento local.** Alternativamente, los datos se pueden guardar en una tarjeta microSD conectada al ESP32 para ser descargados posteriormente. Esta opción es ideal para proyectos de campo donde no hay acceso a internet.

### Personalización del sistema

El sistema básico descrito se puede adaptar fácilmente para trabajar con diferentes tipos de sensores.

- **Estaciones de monitoreo ambiental.** Agregando sensores de calidad del aire y humedad, entre otros, es posible construir una estación completa (Figura 2).
- **Estudios geofísicos.** Al integrar sensores de vibración, inclinación, desplazamiento, entre otros, se podrían realizar estudios sísmicos de baja escala y subsidencia, entre otros.
- **Medición de ruido ambiental.** Al sistema se pueden adaptar micrófonos para detectar los cambios en el ruido generado en entornos urbanos. Esto se puede calibrar para ver la intensidad del ruido en decibeles y ayudar a prevenir daños a la salud generados por el ruido excesivo.

Los códigos base para el funcionamiento de cada sensor están disponibles usualmente en los sitios web del fabricante, pero también existen muchos códigos disponibles de forma gratuita en la red.

Los sistemas descritos con diferentes sensores pueden combinarse muy bien con diseños e impresiones en 3D para la fabricación de gabinetes, soportes y piezas útiles para el funcionamiento (Figura 2).

### Aplicación práctica: detección de tormentas geomagnéticas

Las tormentas geomagnéticas son eventos causados por la actividad solar. El Sol emite constantemente un flujo de partículas y un campo magnético hacia el espacio, este flujo recibe el nombre de viento solar.

Cuando ocurre un evento eruptivo en la superficie del Sol se expulsa una gran cantidad de material mayor al flujo normal del viento solar: en algunas ocasiones esta ola de partículas se mueve en dirección a la Tierra. El CMT actúa como una barrera para el viento solar. Si la ola de partículas debida a una erupción solar cumple con las condiciones adecuadas, ocurre una tormenta geomagnética, que es cuando las partículas del viento solar logran entrar a la atmósfera. Para que ocurra la tormenta, el viento solar debe tener cierta densidad y velocidad para lograr traspasar la magnetósfera. La orientación del campo magnético es la variable más importante.

El primer indicador de que ocurre una tormenta es el flujo visible de partículas en la atmósfera, pero esto suele ser solo visible en latitudes cercanas a los polos, las llamadas auroras boreales y australes (Akasofu, 1981). El efecto global de una tormenta es el descenso en la intensidad del campo magnético terrestre. Para cuantificar una tormenta se utiliza el índice DST (del inglés, Disturbance Storm Time) que se obtiene promediando el valor de diferentes estaciones que monitorean el campo magnético en diferentes puntos del planeta (Ahn *et al.*, 2002; Cerrato *et al.*, 2004). La tormenta se puede observar como un descenso drástico en la intensidad del campo magnético para luego regresar a la normalidad un par de días después. Conocer los



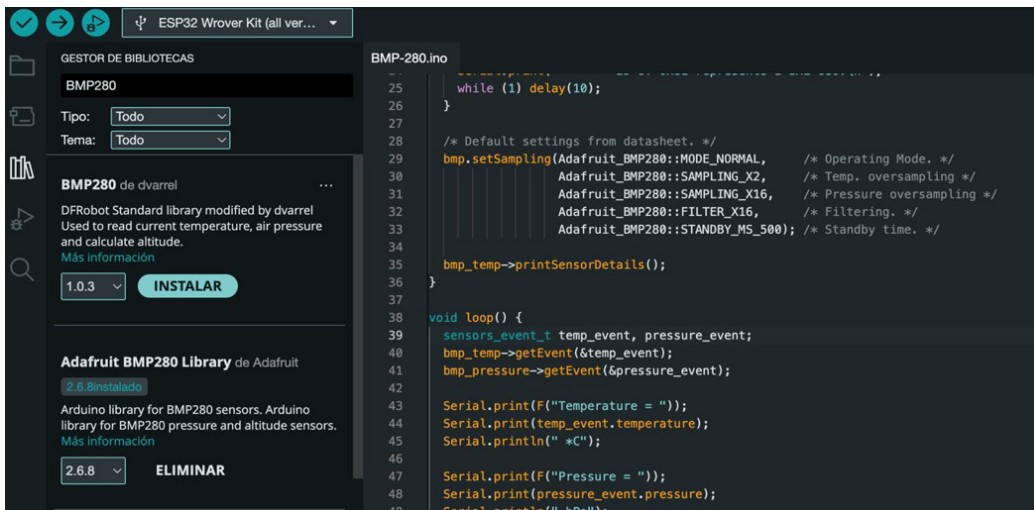


Figura 6. Ejemplo de búsqueda de librerías en el IDE de Arduino.

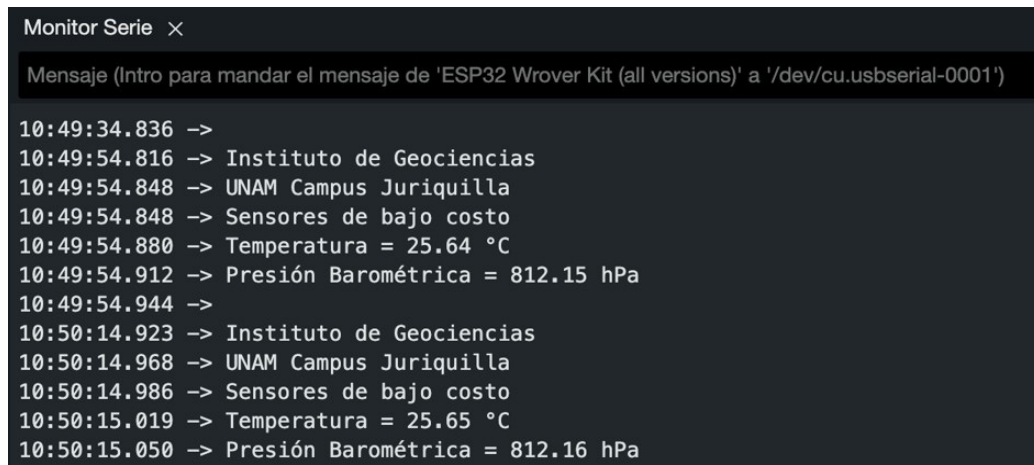


Figura 7. Salida de datos en el monitor serie luego de la conexión del sensor BMP280.

efectos de las tormentas geomagnéticas permite predecir y remediar posibles afectaciones a las telecomunicaciones y al suministro de energía eléctrica.

El día 9 de mayo de 2024, el satélite de la NASA GOES-16 detectó una serie de erupciones solares y en particular una que se observaba como una zona brillante. Este evento llegó a la Tierra el día 10, provocando auroras visibles en lugares cercanos a los polos como Canadá o Australia, también en países como Estados Unidos y Alemania, e incluso algunos medios reportaron auroras en México (Lazzús y Salfate, 2024).

Revisando los datos de las estaciones EMGA en la ciudad de Querétaro, se logró registrar el descenso en el campo magnético durante los días de la tormenta: comparado con días anteriores, el campo magnético para la zona de Querétaro disminuyó entre 5% y 10%. La Figura 8 muestra las fluctuaciones diarias del CMT. Si bien la intensidad del CMT está dada en  $\mu\text{T}$ , las curvas fueron normalizadas para poder mostrar la misma escala.

En la Figura 8 se observa el registro de cuatro estaciones con sensor de campo magnético en diferentes puntos de la ciudad de Querétaro: cada estación se muestra con un color diferente. La serie de tiempo muestra los datos tomados por las estaciones EMGA

entre el 05 y el 15 mayo de 2024. La curva azul es un modelo de la variación diurna normal del campo esperado con base en varios días de mediciones. Los días 10 y 11 de mayo se observa que la intensidad del campo no llega a los mismos valores que en los 5 días anteriores. Este descenso coincide con el momento donde ocurre la tormenta geomagnética. La curva roja de la Figura 8 muestra este descenso considerable en el DTS.

Aunque son sensores económicos son capaces de brindarnos información de estos eventos, en este caso sobre cómo cambian las condiciones del campo magnético en Querétaro y su interacción con la actividad solar, durante una tormenta geomagnética.

En este ejemplo describimos la implementación de un sistema de monitoreo del CMT en tiempo real, con lo que es posible analizar el efecto de las tormentas geomagnéticas en zonas urbanas a latitudes bajas como la ciudad de Querétaro.

#### Descripción del sistema

El sistema se compone de un sensor de campo magnético tipo HMC5883L, un sensor de tres ejes capaz de medir la intensidad y la dirección del campo magnético terrestre y una placa de desarrollo tipo ESP32 (Figura 4). El sistema está diseñado para manejar los datos

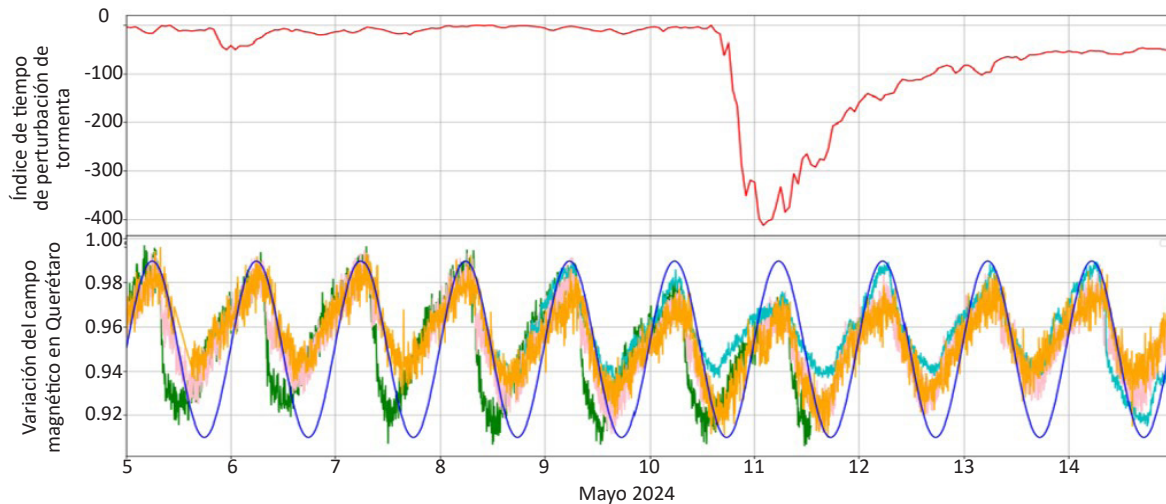


Figura 8. Serie de tiempo con datos entre el 5 y 15 de Mayo, que muestra la detección de la tormenta geomagnética en los dispositivos EMGA entre el 9 y 11 de Mayo de 2024. La curva roja (arriba) muestra el ajuste del DST que ilustra la disminución de la intensidad del CMT durante la tormenta geomagnética. Se ilustran en colores diferentes las curvas de obtenidas por casa estación (abajo).

del sensor y los transmite en tiempo real vía Wifi a una plataforma de almacenamiento, procesamiento y visualización. El ESP32 es ideal para este tipo de aplicaciones debido a su capacidad de conectividad vía inalámbrica, lo que permite que los datos sean enviados de manera automática a un servidor http o directamente a un dispositivo móvil para su análisis.

#### Funcionamiento

El sensor mide las componentes vectoriales del CMT ( $x$ - $y$ - $z$ ), por lo que es necesario calcular su intensidad. Este cálculo es bastante simple: al ser un vector de tres componentes, basta con calcular su magnitud para obtener la intensidad del CMT con resultados del campo dados en microTeslas ( $\mu$ T). Con este dato se pueden detectar perturbaciones en el campo que puedan indicar el inicio y progreso de una tormenta geomagnética. Los datos se analizan en tiempo real, pueden ser representados gráficamente y, cuando se detectan cambios significativos en la intensidad del campo magnético, se puede generar una alerta.

Los datos obtenidos pueden ser corregidos para compararlos con índices geomagnéticos oficiales, como el índice Kp (por ejemplo Rostoker, 1972; Matzka *et al.*, 2021), que mide la actividad geomagnética global, o con mediciones de observatorios magnéticos especializados (Hernández-Quintero *et al.*, 2018). Si bien este sistema no tiene la precisión de equipos comerciales de amplia gama, su bajo costo y facilidad de desarrollo lo hacen ideal para proyectos educativos y para la implementación de redes de sensores distribuidos en áreas remotas.

## CONCLUSIONES

El uso de plataformas de desarrollo como Raspberry Pi, Arduino y ESP32, junto con sensores de bajo costo, representa una herramienta innovadora y accesible para la investigación y monitoreo en diferentes ramas científicas, incluyendo geociencias. Estos sistemas que se caracterizan por su bajo costo, versatilidad y facilidad de integración ofrecen una alternativa viable para investigadores,

estudiantes y aficionados que buscan acceder a tecnologías anteriormente limitadas, a equipos de alta precisión y elevados costos. Su capacidad para almacenar y procesar grandes volúmenes de datos en tiempo real, así como su integración con plataformas en la nube, los hace especialmente útiles para proyectos de monitoreo continuo y a largo plazo.

No obstante, es importante considerar que la precisión de los sensores de bajo costo puede ser limitada en comparación con los equipos profesionales. Sin embargo, su excelente relación costo-beneficio los convierte en una buena opción para estudios exploratorios o en entornos educativos. Con una correcta calibración y un uso adecuado, estos sistemas pueden proporcionar resultados relevantes y de valor científico. En el caso de estudio propuesto en este trabajo, para la detección de tormentas geomagnéticas, se emplea un ESP32 y un sensor de campo magnético terrestre. Este sistema, aunque simple, ha demostrado ser eficaz en la detección de variaciones significativas en la intensidad del campo magnético terrestre en latitudes bajas, como es el caso de la ciudad de Querétaro, donde se observa el registro de un descenso considerable en la intensidad del campo magnético terrestre debido a su interacción con la actividad solar. Lo anterior sugiere su viabilidad como herramienta para el monitoreo de estos eventos geomagnéticos.

Finalmente, el uso generalizado de estos sistemas podría tener un impacto significativo en el campo de las geociencias, al facilitar una mayor participación de la comunidad científica global y la generación de datos en regiones geográficas amplias. Esto contribuiría al avance en el entendimiento de los fenómenos naturales a través de una red de monitoreo accesible y replicable cuyos datos podrían ser compartidos y aprovechados por diversas instituciones a nivel nacional e internacional. La democratización de estas tecnologías en las ciencias de la Tierra abre nuevas posibilidades para estudios colaborativos y de amplia cobertura, lo que representa un paso importante hacia una ciencia más inclusiva y participativa.



## AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Jorge Escalante por el apoyo técnico brindado. Gracias al Laboratorio de Paleomagnetismo de Rocas del Instituto de Geociencias de la UNAM por proporcionar los materiales necesarios. Nuestro agradecimiento también a los editores y revisores, cuyas sugerencias han enriquecido este trabajo.

## REFERENCIAS

- Akasofu, S. I. (1981). Relationships between the AE and Dst indices during geomagnetic storms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 86(A6), 4820-4822.
- Ahn, B. H., Moon, G. H., Sun, W., Akasofu, S. I., Chen, G. X., y Park, Y. D. (2002). Universal time variation of the Dst index and the relationship between the cumulative AL and Dst indices during geomagnetic storms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 107(A11), SMP-38.
- Anthony, R. E., Ringler, A. T., Wilson, D. C., y Wolin, E. (2019). Do low-cost seismographs perform well enough for your network? An overview of laboratory tests and field observations of the OSOP Raspberry Shake 4D. *Seismological Research Letters*, 90(1), 219-228.
- Cameron, N. (2023). ESP32 microcontroller en ESP32 Formats and Communication: Application of Communication Protocols with ESP32 Microcontroller (pp. 1-54). Berkeley, CA: Apress.
- Cerrato, Y., Saiz, E., Cid, C., y Hidalgo, M. A. (2004). Geomagnetic storms: Their sources and a model to forecast the Dst index. *Lecture Notes and Essays in Astrophysics*, 1, 165-176.
- De Plaen, R. S., Márquez-Ramírez, V. H., Pérez-Campos, X., Zuñiga Davila-Madrid, F. R., Rodríguez-Pérez, Q., Gómez González, J. M., y Capra, L. (2020). Seismic signature of the COVID-19 lockdown at the city-scale: A case study with low-cost seismometers in the city of Querétaro, Mexico. *Solid Earth Discussions*, 2020, 1-17.
- Delgado-Castro, A., y Rojas-Bolaños, O. (2015). Construcción de un sistema de bajo costo para el uso y evaluación de sensores semiconductores para gases. *Educación Química*, 26(4), 299-306.
- Hernández-Quintero, E., Goguitchaichvili, A., García-Ruiz, R., Cervantes-Solano, M., y Cifuentes-Nava, G. (2018). Más de 100 años ininterrumpidos de registro geomagnético en México: implicaciones en la datación absoluta de algunos edificios históricos. *Arqueología Iberoamericana*, 39, 36-43.
- Ismailov, A. S., y Jo'Rayev, Z. B. (2022). Study of Arduino microcontroller board. *Science and Education*, 3(3), 172-179.
- Kaur, K., y Kelly, K. E. (2023). Laboratory evaluation of the Alphasense OPC-N3, and the Plantower PMS5003 and PMS6003 sensors. *Journal of Aerosol Science*, 171, 106181.
- Lazzús, J. A., y Salfate, I. (2024). Report on the effects of the May 2024 Mother's day geomagnetic storm observed from Chile. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 261, 106304.
- Maier, A., Sharp, A., y Vagapov, Y. (2017, September). Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things. In *2017 Internet Technologies and Applications (ITA)* (pp. 143-148). IEEE.
- Matzka, J., Bronkalla, O., Tornow, K., Elger, K., y Stolle, C. (2021). Geomagnetic kp index. *GFZ German Research Centre for Geosciences*, 11.
- Rani, S. U., Rajarajeswari, S., Jaimon, J. G., y Ravichandran, R. O. S. H. A. N. (2020). Real-time air quality monitoring system using MQ-135 and thingsboard. *Journal of critical reviews*, 7(18), 4107-4115.
- Richardson, M., y Wallace, S. (2014). *Getting Started with Raspberry Pi: Electronic Projects with Python, Scratch, and Linux*. Maker Media, Inc.
- Rodríguez-Trejo, A., Böhnell, H.N., Ibarra-Ortega, H.E., Salcedo, D., González-Guzmán, R., Castañeda-Miranda, A.G., Sánchez-Ramos, L.E. y Chaparro, M. A. E., (2024) Air quality monitoring with low-cost sensors: a record of the increase of PM2.5 during Christmas and New Year's Eve celebrations in the city of Queretaro, Mexico. *Atmosphere* 2024, 15, 879. <https://doi.org/10.3390/atmos15080879>
- Rostoker, G. (1972). Geomagnetic indices. *Reviews of Geophysics*, 10(4), 935-950.

Manuscrito recibido: 23 de septiembre de 2024

Manuscrito corregido recibido: 8 de noviembre de 2024

Manuscrito aceptado: